

배기관 내 압력 변동 분석에 의한 가솔린 기관의 실화 검출

Misfire Detection of a Gasoline Engine by Analysis of the Variation of Pressure in the Exhaust Manifold

심 국 상*, 북 중 혁**, 김 세 웅***
Kooksang Sim, Junghyock Bok, Sewoong Kim

ABSTRACT

This paper describes the method for detection of the misfired cylinder by analysis of the variation of pressure occurred in exhaust manifold on an MPI gasoline engine.

Misfired cylinder(s) cause a loss of power, an increase of fuel consumption and exhaust emission and vibration is caused by unsteady torque.

Therefore early detection and correction of misfired cylinder(s) play a very important role in the proper performance and the exhaust emission.

The method is a comparison of integration pressure index during the period of a blowdown in the displacement period. Experimental results showed that the method, using the variation of pressure in the exhaust manifold is proven to be effective in the detection of single cylinder or multiple cylinders misfire on the gasoline engine regardless of the engine revolutions.

In addition, this method, using the variation of pressure in the exhaust manifold is a very easy and accurate method compared with other methods.

주요기술용어 : Displacement period(배기 구간), Integration pressure index(적분 압력 지수), Misfire detection(실화 검출), Exhaust emission(배기 배출물)

1. 서 론

최근 탄화수소, 일산화탄소, 질소산화물 등의

유해 배기 배출물을 배출하는 가솔린 기관에 대한 대기 오염 규제가 날로 심각해지고 있는 실정이다. 따라서, 가솔린 기관의 개발에 있어서 배출 가스 저장 시스템의 결함을 감지하는 OBD - II 규제를 만족시키기 위한 연구는 반드시 선행되어야 할 과제이며, 특히, OBD - II에 규정된 10가지 감시 항목중의 하나인 실화 검출은 촉매가 손상을 입을 정도의 실화를 또는 LA-4 Mode

* 정회원, 금오공과대학교 대학원
** 금오공과대학교 기계공학부
*** 정회원, 금오공과대학교 대학원

emission이 규제치의 1.5배를 초과하는 실화율이 발생하였을 때 실화를 감지하도록 규정하고 있다⁽¹⁾.

가솔린 기관에서 실화가 발생되면 기관에서 배출되는 탄화수소 및 산소 농도가 증가되기 때문에 ECU의 Feed-back 제어에 의해 점점 더 농후한 혼합기가 형성된다.

따라서, 탄화수소와 일산화탄소 등의 유해 배출물은 더욱 증가하게 되며, 이론 공기 연료비 운전 영역과 활성화 온도에 영향을 받는 3원 촉매는 기능을 발휘할 수 없음은 물론 치명적인 손상을 입게 된다⁽²⁾.

더욱이, 기관에서의 실화 발생은 유해 배기 배출물의 증가뿐만 아니라, 동력 손실, 연료 소비 증가, 토크 불균일에 의한 진동을 유발시킨다.

그러므로, 기관의 이상 진단 중 실화의 조기 진단 및 검출은 배기 배출물의 저감, 연비, 동력, 3원 촉매 등의 여러 가지 측면에서 반드시 선행 연구되어야 할 항목이다.

실화 검출에 대한 방법은 실린더 내의 연소 정보를 직접적으로 취득하여 실화를 구분해내는 방법^(3,4)과 관계 변수들인 배기 가스 성분 분석, 크랭크축 각속도 변동 등을 비교 분석하는 간접적인 방법 등이 수행되고 있다⁽⁵⁻⁹⁾.

그러나, 실화 검출에 대한 직접적인 방법은 정확한 검출 결과를 얻을 수 있으나, 기관 개조 및 고온에 의한 센서의 내구성 문제가 있으며, 간접적 방법은 연료 및 점화 불량에 의한 실화 발생 조건에 따라 그 값의 차이가 현저하여 실화 검출에 어려움이 있다.

본 연구에서는 기관 개조 등의 어려움이 없는 간접적인 방법으로서, 배기 대기관 내의 배기 가스의 압력 변동에 대해 정상적인 연소의 경우와 실화가 발생했을 때를 비교, 분석하여 단수⁽¹⁰⁾ 및 복수 실화 실린더를 판별해내는 방법을 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

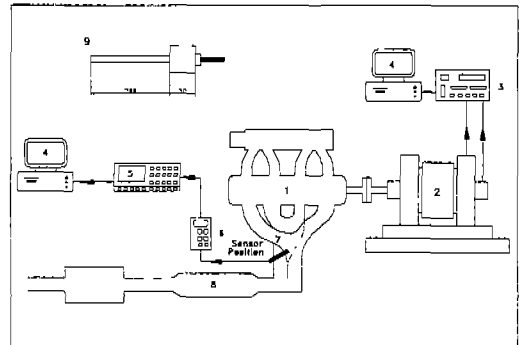
2.1 실험 장치

점화시기 제어에 따라 순차적인 점화를 행하는 4행정, 4실린더 가솔린 기관의 경우 연소실에서 형성된 고온 고압의 연소 가스는 배기 대기관, 3원 촉매, 소음기 등을 통하여 대기로 방출된다.

따라서, 본 연구에서는 각각의 실린더에서 배출되는 배기 가스의 압력 특성을 분석하기 위하여 배기 대기관에 센서를 직접 설치하여 배기 가스의 압력 특성을 분석하였으며, 또한, 기관의 부하가 증가함에 따른 배기 대기관의 급격한 온도 상승에 기인한 압력 센서의 파손을 막기 위해 Fig.2.1에 나타낸 것과 같은 End-box를 제작하여 배기 대기관 내의 압력 변동을 분석하였다.

본 연구에서는 분석한 결과를 토대로 압력 파형이 보다 명확하게 나타나며, 급격한 온도 상승이 없는 End-box를 설치한 경우의 실험 결과를 실화 검출 자료로 사용하였다.

배기 대기관 내에서의 압력 변동을 이용하여 기관의 실화를 검출하기 위해 사용된 실험 장치에 대한 개략도는 Fig. 2.1과 같다.



- | | |
|----------------------------|----------------------|
| 1. Engine | 2. Dynamometer |
| 3. Dynamometer controller | 4. Personal computer |
| 5. Data acquisition system | 6. Amplifier |
| 7. Exhaust manifold | 8. 3-way catalyst |
| 9. End-box | |

Fig.2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

배기관 내에서의 압력 변동 특성을 측정하기 위해 사용된 압력 변환기는 Kistler사의 piezoresistive 압력 변환기를 사용하여 측정하였다.

2.2 실험 방법

기관의 회전수 및 부하는 동력계를 사용하여 여러 단계에서 일정하게 유지하였으며, 정상적인 운전과 실화 운전에 대해 각각의 실험을 행하였다.

배기 대기관 내의 압력 측정을 위하여 Fig. 2.1에서 보여준 것과 같이 각 실린더에서의 배기 가스가 한곳으로 모이는 배기 대기관 출구 부분에 센서를 설치하였다. 이 위치는 각각의 실린더 내에서 발생된 연소 가스가 가진 압력 특성을 최대한 이용할 수 있을 뿐만 아니라, 배기 가스가 배기계를 진행하면서 서로 혼합됨에 따른 압력과의 왜곡을 줄일 수 있다.

가솔린 기관에서의 실화 발생은 대부분 연료 계통 및 점화 계통의 불량으로 발생하기 때문에 본 연구에서는 연료를 차단한 경우와 점화를 차단한 경우를 비교 분석한 후, 3원 촉매의 급격한 온도 상승을 막을 수 있는 연료 차단 방법의 의해 특정 실린더에 대한 실화 조작을 행하였으며, 배기 대기관의 압력을 측정하는 동안 특정 실린더에서 실화가 연속적으로 일어나게 하여 단수 및 복수 실린더 실화를 판정하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 센서 설치 방법에 따른 배기 대기관 압력 변동 특성

Fig. 3.1은 정상적인 연소를 행하는 경우로 기관의 회전수가 1500rpm, 2500rpm일 때, 각각의 회전수에서 흡기관 압력이 -60kPa, -40kPa, -20kPa에서의 배기 대기관 압력 파형을 나타내고 있다.

Fig. 3.1의 (a)는 배기 대기관에 센서를 직접 설치한 경우이며, (b)는 배기 대기관에 본 연구를 위해 제작한 End-box를 설치했을 때의 배기 대기관 압력 특성을 나타내고 있다.

Fig. 3.1의 (a),(b)에서 전체 실린더 중 1,3번 실린더의 압력 파형이 4,2번 실린더의 압력 파형보다 크게 나타나고 있다. 이것은 배기 대기관에

서의 압력이 1번과 4번 실린더가 합쳐지고, 2번과 3번 실린더가 합쳐지는 형상에서 센서의 위치가 1번과 3번 배기 대기관의 압력에 직접적으로 노출되는 반면, 2번과 4번 배기 대기관의 압력은 배기 대기관의 기하학적 형상에 기인하여 한번 굴곡된 후 센서에 노출되기 때문에 1번과 3번 실린더의 압력과 비교하여 상대적으로 낮은 값을 가진다고 사료된다.

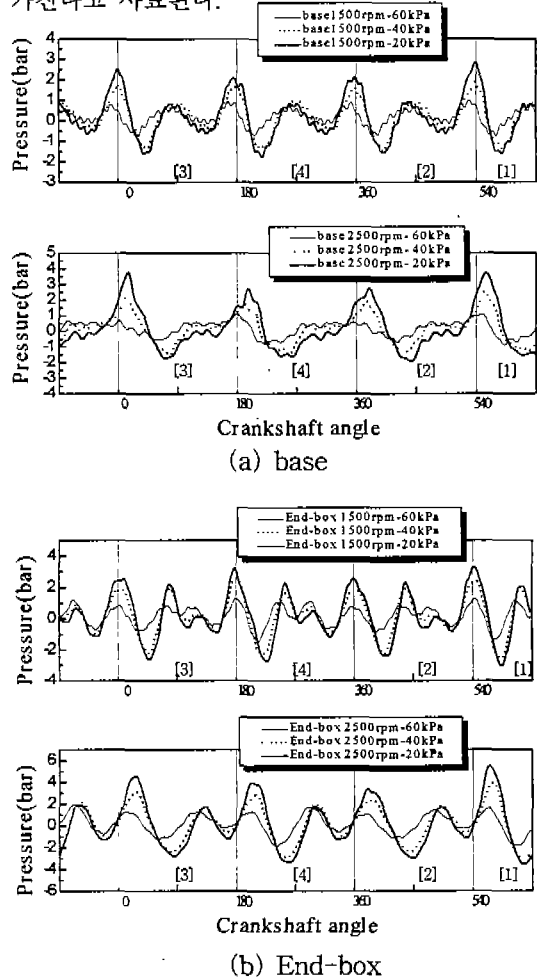


Fig. 3.1 Comparison of pressure fluctuations as the engine speed varied

또한, 실린더 내에서 발생된 연소 가스가 센서의 위치까지 진행하는 거리만큼의 지연 현상도 발생하고 있다.

점화 시기 제어에 따라 순차적인 점화를 행하

는 4행정 4실린더 가솔린 기관의 경우, 한 사이클 동안에 각 실린더로부터 배출되는 배기 가스는 180°를 주기로 하는 맥동 흐름 상태로 팽창 행정 말기에 배기 밸브를 통해 배출되는 blowdown 과정과 blowdown 후, 피스톤의 상승에 의한 배기 구간을 가지게 된다.

Fig. 3.1의 (a),(b)에서 보는 바와 같이 blowdown의 영향에 의한 1차 압력 파형의 극대값은 부하가 증가함에 따라 실린더 내의 연소 압력이 증가하기 때문에 크게 나타나고 있지만, blowdown 이후 실린더 내에 잔류한 연소 가스와 피스톤의 상승에 의한 2차 압력 파형은 1차 압력 파형보다 극대값이 감소하는 경향을 볼 수 있다.

이것은 팽창 행정 말기에 배기 밸브가 개방되는 blowdown시에 대부분의 압력이 배출되고, blowdown 후 잔류한 연소 가스의 양이 거의 일정하기 때문이라 판단된다.

또한, 1차 압력 파형의 극대값이 증가함에 따라 압력 강하 현상에 기인한 2차 압력 파형의 극대값이 감소하는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 3.1의 (b)의 경우는 End-box를 사용한 결과로서, 직접 설치한 경우보다 압력이 약간 증가함과 동시에 압력 파형이 지연되는 현상을 나타내고 있다.

이것은 배기 대기관에 End-box를 설치함에 따라 End-box의 기하학적 형상에 따라 팽창 효과를 가지는 반면, End-box의 파이프를 통해 전달되는 압력파의 전달은 늦어지기 때문이라 판단된다.

3.2 실화 실린더가 포함된 기관의 배기 대기관 압력 특성 변동

3.2.1 단수 실린더 실화

Fig. 3.2는 2번 실린더가 실화를 일으키는 기관에 대해 1500rpm, 2500rpm의 기관 회전수에 서 부하에 따른 배기 대기관 내의 압력 변동 특성을 End-box를 이용하여 실험 결과를 나타냈다.

Fig. 3.1의 정상적인 연소를 행하는 기관의 경우에는 각각의 실린더에서 발생된 1차 및 2차 압력 파형이 일정하게 나타나고 있지만, 특정 실린더에서 실화가 발생되면 실화 실린더의 경우에는 2차 압력 파형은 나타나고 있지만, 1차 압력 파형은 나타나지 않게 된다. 이것은 실화가 발생한 실린더에서는 연소에 의한 압력 상승이 일어나지 않기 때문이며, 저속에서는 실화 실린더의 역류 현상이, 고속에서는 이전 실린더의 배기에 기인한 압력 강하 현상으로 판단된다.

그러나, 흡입된 공기 및 역류된 가스가 피스톤의 상승 운동에 의해 배출되는 2차 압력 파형은 약하게 형성됨을 볼 수 있다.

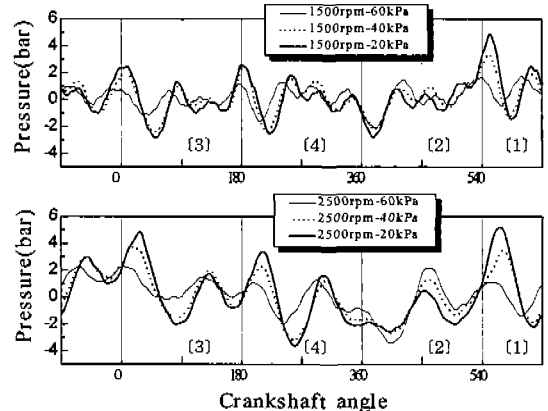


Fig 3.2 Reiteration of pressure fluctuations at the second cylinder misfired as the rpm and the intake pressure varied

3.2.2 복수 실린더 실화

Fig. 3.3은 1번 실린더와 4번 실린더가 실화를 일으키는 기관에 대해 배기 대기관 내의 압력 변동 특성을 나타냈다.

4 행정 가솔린 기관의 경우, 점화 시기 제어에 따라 각각의 실린더에서 발생한 연소 가스는 1-3-4-2번 실린더의 순서로 배기관을 통하여 방출된다.

따라서 1번과 4번 실린더의 복수 실린더 실화는 720°에 걸쳐 360°를 주기로 하는 대칭적인 현상을 나타내게 된다.

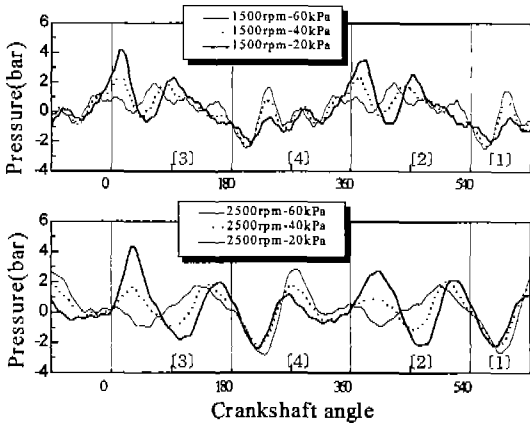


Fig. 3.3 Reiteration of pressure fluctuations at the first and the fourth cylinder misfired as the rpm and the intake pressure varied

각각의 회전수에서 대칭 복수 실린더 실화가 발생한 경우, 단수 실린더 실화에서와 같이 blowdown에 의한 1차 압력 파형이 나타나지 않고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3.4는 4번과 2번 실린더가 연속적으로

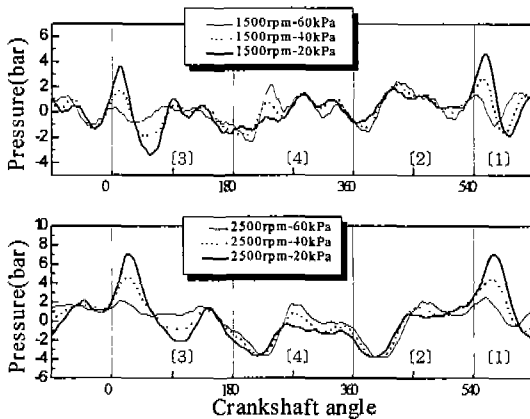


Fig. 3.4 Reiteration of pressure fluctuations at the fourth and the second cylinder misfired as the rpm and the intake pressure varied

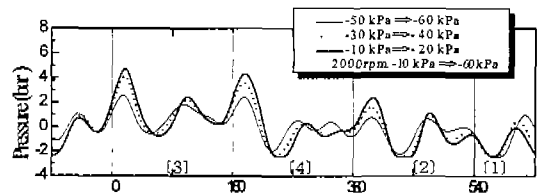
실화를 일으키는 기관에 대해 배기 대기관내의 압력 변동 특성을 나타냈다.

연속 복수 실린더 실화의 경우는 연속적으로 2

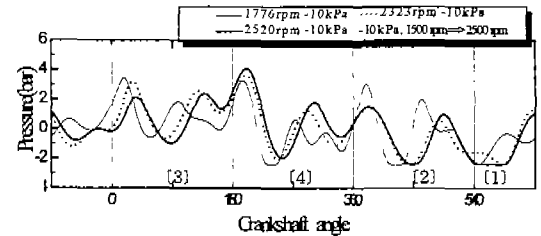
개의 실린더가 연속적으로 실화가 발생되며, 2개의 실린더가 연속적으로 정상적인 연소를 행한 결과의 압력 파형을 나타낸다.

Fig. 3.4의 연속 복수 실린더 실화에서도 대칭 복수 실린더와 같이 2차 압력 파형은 약하게 형성하지만, 1차 압력 파형은 형성하지 못함을 볼 수 있다.

3.2.3 가감속 조건에서의 배기 대기관 압력 파형



(a) 2000 rpm



(b) - 10 kPa

Fig. 3.5 Reiteration of pressure fluctuations at the first cylinder misfired as the rpm and the intake pressure varied

Fig. 3.5는 1번 실린더에 실화가 일어난 경우로서, (a)는 기관의 회전수가 일정하고 부하가 변화하는 경우이며, (b)는 부하가 일정하고 회전수가 변화할 때의 압력 파형을 나타낸 것이다

전반적으로 Fig. 3.2의 단수 실린더의 실화와 유사한 경향을 나타내고 있는데, 이것은 비록 기관의 운전 상태가 가, 감속 조건에 있다할지라도 실화가 발생되면, 실화 실린더의 blowdown에 해당하는 1차 압력 파형이 형성되지 못함에 기인한 것으로 사료된다.

따라서, 기관의 운전 영역이 가, 감속 조건이라 할지라도 실화 실린더의 판별 가능함을 볼 수 있다.

4. 적분 압력 지수에 의한 실화 검출

4.1 적분 압력 지수

이상으로 정상적인 연소를 행하는 실린더와 단수 및 복수 실화 실린더가 포함된 기관의 배기 다기관 압력 파형을 분석하였으며, 분석한 결과, 각각의 실린더에 해당하는 배기 구간에서의 blowdown에 의한 압력이 최대가 되는 구간이 하사점 전 10° 에서 하사점 후 30° 사이임을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구에서는 앞서 발표한 연구에서 제시한 평균 압력 지수⁽¹⁰⁾의 분석 구간 보다 작으며, 단수 실린더 실화, 복수 실린더 실화 및 가감속 운전시에도 실화 실린더를 판정할 수 있는 적분 압력 지수를 다음과 같이 정의하였다.

먼저, 각각의 실린더가 blowdown 과정에 해당하는 하사점 전 10° 에서 하사점 후 30° 까지의 압력을 적분하였으며, 적분된 IP(Integration Pressure)값 중에서 단수 및 복수 실린더 실화가 발생한 경우에는 실화에 기인한 blowdown에 의한 압력이 현저히 낮아지게 되므로, 1500 rpm에서는 - 1 이하의 값을, 2000 rpm이상에서는 - 2.5이하의 값을 가지게 된다.

$$IP = \int_{-10^{\circ}}^{30^{\circ}} P$$

따라서, 본 연구에서는 적분 압력을 기본으로 하여 50cycle 분의 적분 압력값을 평균한 값에 임의의 값을 뺀 각각의 회전수에서의 한계값을 적분 압력 지수 IPI(Integration Pressure Index)로 설정하였으며, 각각의 회전수에 따라 설정된 적분 압력 지수 이하로 각 실린더의 적분 압력이 적분되면 실화 실린더로 판별하게 하였다.

$$\begin{aligned} IPI = -1.0 & : 1500 \text{ rpm} \\ -2.5 & : 2000 \text{ rpm} \\ -2.5 & : 2500 \text{ rpm} \end{aligned}$$

4.2 적분 압력 지수를 이용한 실화 판정

Table 4.1 Misfire detection using the IPI at the intake pressure of -60 kPa as the engine speed varied

IP	RPM	MC	I P				IPI
			# 1	# 2	# 3	# 4	
-60 kPa	1000	# 1	-6.65	0.49	2.84	2.10	- 1.0
		# 2	4.36	-7.28	156	0.71	
		# 3	1.62	2.13	-6.82	4.45	
		# 4	206	3.80	0.26	-7.10	
		#1,4	-6.94	2.89	2.97	-7.19	
		#4,2	5.33	-4.50	0.84	-8.42	
	2000	# 1	-12.88	-1.40	3.21	4.00	- 2.5
		# 2	6.67	-14.08	3.22	1.32	
		# 3	1.43	3.94	-13.33	6.89	
		# 4	5.14	6.32	-1.46	-14.03	
		#1,4	-10.59	0	0.10	-10.58	
		#4,2	11.13	-12.35	7.53	-13.22	
2500	# 1	-12.22	4.38	-0.13	12.82	- 2.5	
	# 2	5.15	-9.89	12.90	4.43		
	# 3	5.73	12.53	-9.47	4.43		
	# 4	14.70	0.13	4.35	-12.66		
	#1,4	-3.60	1.42	0.78	-3.55		
	#4,2	14.29	-12.08	13.06	-10.09		

IP : Intake pressure MC : Misfired Cylinder

적분 압력 지수에 의한 정상 실린더와 실화 실린더를 분석한 결과를 Table 4.1 과 Table 4.2 에 나타냈다.

Table 4.2 Misfire detection using the IPI at the intake pressure of - 20 kPa as the engine speed varied

IP	RPM	MC	I P				IPI
			# 1	# 2	# 3	# 4	
-20 kPa	1000	# 1	-8.16	9.00	16.27	10.12	- 1.0
		# 2	16.54	-10.20	8.97	7.99	
		# 3	10.76	10.03	-8.19	15.30	
		# 4	11.24	15.46	9.09	-10.08	
		#1,4	-10.08	6.52	6.78	-10.50	
		#4,2	20.10	-1.65	11.89	-9.70	
	2000	# 1	-11.47	8.95	26.45	24.65	- 2.5
		# 2	29.14	-15.09	22.90	12.87	
		# 3	17.04	20.57	-14.74	23.74	
		# 4	29.46	23.61	12.74	-13.44	
		#1,4	-11.40	17.86	21.45	-12.04	
		#4,2	36.15	-7.68	20.64	-18.84	
2500	# 1	-17.41	7.69	11.16	21.11	- 2.5	
	# 2	17.46	-13.83	22.68	6.22		
	# 3	10.99	19.06	-12.66	13.97		
	# 4	24.00	8.67	11.48	-17.51		
	#1,4	-4.63	6.88	10.02	-3.38		
	#4,2	27.33	-16.29	28.72	-16.91		

IP : Intake pressure MC : Misfired Cylinder

적분 압력 지수에 의한 분석 결과 흡기관 부하에 관계없이 전 영역에서 정확히 실화 실린더를 판별할 수 있었다.

4.3 적분 압력 지수의 검증

Fig. 4.1 과 Fig 4.2는 본 연구에서 정의한 적분 압력 지수를 검증하기 위한 자료로서 Fig. 4.1은 기관의 회전수가 1500rpm, 흡기관 압력이 - 60 kPa 일 때의 경우이며, Fig 4.2는 기관의 회전수가 2500rpm, 흡기관 압력이 - 20 kPa 일 때의 경우이다.

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 각각의 기관 회전수와 흡기관 부하에서 정상적인 연소를 행하는 기관과 특정 실린더에 대한 실화 조작에 의해 실화가 일어나고 있는 기관의 운전 중 임의로 각각 15 사이클에 해당하는 자료를 취득하여 흡기관 부하에 따른 적분 압력 지수를 검증한 것이다.

따라서, Fig. 4.1과 Fig. 4.2의 가로축의 Cycle number는 각각의 운전조건에서 15 cycle씩 실험한 결과를 누적시킨 것이다.

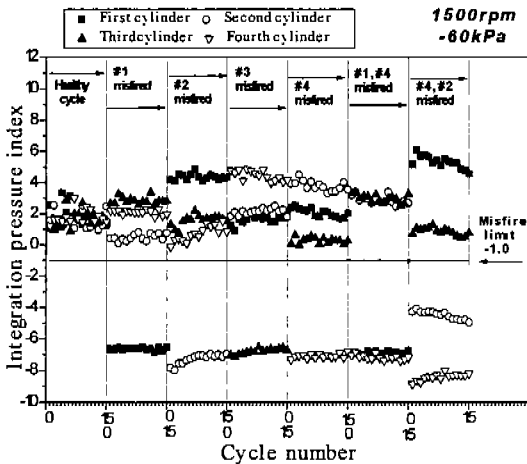


Fig. 4.1 Comparison of integration pressure index of the healthy and the misfired cylinder(s)

Fig. 4.2에서 1번과 4번 실린더가 동시에 실화가 일어난 경우, 1번, 4번 실린더가 실화 한계 값에 근접하고 있으나, 이 값은 크랭크 각도로 40°에 해당하는 압력값을 적분한 값이기 때문에

실제적으로는 많은 차이를 가진다 할 수 있다.

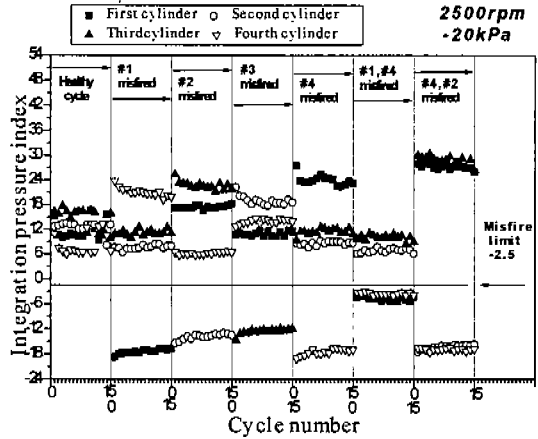


Fig. 4.2 Comparison of integration pressure index of the healthy and the misfired cylinder(s)

Fig. 4.1과 Fig. 4.2 에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 실화 실린더를 검출하기 위해 설정한 적분 압력 지수가 타당함을 입증하고 있다.

5. 결론

정상적으로 작동하는 가솔린 기관에서 여러 가지 요인에 의해 실화가 발생할 수 있는데, 배기관 내의 압력 파형의 특성을 이용하여 본 실험을 행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 가솔린 기관의 배기관 내에서의 압력 파형은 정상적으로 연소하는 경우, blowdown의 영향에 의한 1차 압력 파형과 연소 가스와 피스톤의 상승에 의한 2차 압력 파형으로 나눌 수 있으며, 부하가 증가할수록 blowdown의 영향에 의한 압력 파형의 극대값이 증가한다.

(2) 단수 및 복수개의 실화 실린더가 포함된 기관의 배기관 내에서의 압력 파형은 2차 압력 파형은 약하게 형성되지만, 1차 압력 파형은 형성되지 못한다.

(3) 각 실린더의 배기 구간 중 blowdown에 의해 형성되는 1차 압력 파형의 극대값 부근의

압력을 적분하여 비교하면 정상적인 연소를 행하는 실린더와 실화 실린더를 정확히 파악할 수 있다.

(4) 본 연구에서 제시된 적분 압력 지수는 단수 및 복수 실린더 실화 검출이 가능하며, 기관의 가감속 영역에서도 실화 검출이 가능하다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구된 결과로 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. California Air resources Board, Californias OBD- II Regulation(section 1968.1, Title 13, California Code of Regulation), Mail-Out #95-03, January,1995.
2. Martin Klenk and Winfried Moser, "Misfire Detection by Evaluating Crankshaft Speed-A Means to Comply with OBD II," SAE Paper 930399, 1993.
3. 윤영석, "연소실 벽면의 순간 온도 변화를 이용한 실화 판정에 관한 연구",서울대학교 공학석사 학위 논문,1996.
4. 손영진, "전기 점화 기관에서 광섬유를 이용한 연소 특성에 관한 연구",서울대학교 공학석사 학위 논문,1994.
5. Sohair F. Rezeca and Naeim A.Henein, "A Diagnostic Technique for the Identification of Misfire Cylinder(s)," SAE Paper 870546, 1987.
6. Naeim A. Henein, Walter Bryzik, Clive Taylor and Angelo Nichols, "Dynamic Parameters for Engine Diagnostics Effect of Sampling," SAE Paper 932411, 1993.
7. Byeongjin Lim, Inkeon Lim, Jongbum Park, Sangsoo Pae, Young S. Yoon and Eungseo Kim, "S.I. Engine Misfire Detection Through the Energy Model," SAE Paper 942059, 1994.
8. 배상수, 김세웅, 임인건, 김응서, "크랭크축 각속도의 변동을 이용한 실화 판정(2)-실차 실험-", 한국자동차 공학회논문집,제4권,제5호,pp.90-99,1996.
9. 김세웅, "크랭크축 각속도 해석에 의한 자동차 기관의 실화 검출," 서울대학교 공학 박사 학위 논문, 1996.
10. 심국상, 북중혁, 김세웅, "배기계 압력 변동을 이용한 가솔린 기관의 실화 검출 -단수 실린더 실화-", 한국자동차 공학회논문집,제6권,제6호,pp210-217. 1998.